

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350489

研究課題名(和文) 時空間データ分析による都市の突風被害予測精度の向上と防災インフォグラフィックス

研究課題名(英文) Improvement of prediction method of damage due to gusty winds using temporal and spacial data analysis and info-graphics for disaster prevention

研究代表者

友清 衣利子 (TOMOKIYO, Eriko)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：30346829

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：都市部で頻発する竜巻被害への対策を講じるためには、ある地域を竜巻等の突風が襲った場合の被害リスクを想定する必要がある。本研究では、顕著な被害をもたらした竜巻被害分布から適切な竜巻経路を設定し、被災地域の建物面積密度および建物の強風被災度ランクを利用して建物被災面積の予測を試み、実際の被害との比較検討を行った。風速が低い場合には、実際の被害と予測とに相違が生じたが、高風速域では予測した建物被災面積と実際の被害がほぼ対応した。また、過去の突風被害事例から人的被害が集中する日時や場所を特定し、竜巻の発生位置や日時に基づく人的被害の推定方法を示して、GIS上に突風による建物と人的被害を可視化した。

研究成果の概要(英文)：It is important to predict a damage risk in an area due to gusty winds in order to make disaster measures. In this paper, we decided the path of the tornado that had remarkable damage. And we tried to predict a damaged area of buildings using building densities and the high wind damage scale by the tornado. Then we compared the actual building damage and the predicted one. Actual occurrence rate of damage building was not coincident with probability density used to predict in an area where smaller wind blew. Therefore, larger damaged area of buildings was predicted than the real damaged area. However, the predicted building damage and the actual one corresponded in an area where stronger winds blew. On the other hand, the place and the time that severe human damage occur were determined using the past gusty winds disaster. And we proposed how to estimate human damage based on the place and the time that tornadoes occur. Then the human and structural damage was visualized on the GIS.

研究分野：建築構造、風工学

キーワード：強風災害 被害予測 竜巻

### 1. 研究開始当初の背景

都市部に発生する竜巻被害はその気象現象の局所性から、事前の予測や対策が不十分である。研究代表者らはこれまでに突風被害の現地調査を行っているが、竜巻等の突風における特徴的な被害には「突風で破損した屋根葺材などの材料が飛散し、近隣の建物に衝突する二次的な被害」と「突風の風圧または飛散物による窓ガラス等の破損が原因の人的被害や建物内部の破損」がある。2012年に北関東で発生した竜巻被害報告の中で、代表者は特に飛散物被害に着目し、被害が甚大であった住宅密集地では近隣建物に二次被害を及ぼす飛散物の数や種類が多く、飛散物被害は土地利用状況と密接な関係にあることを報告した。また、学校校舎など、多くの人々が活動する建物を竜巻が直撃すると、窓などの開口部が破損し、飛散したガラス片で手足の切り傷などの負傷者が多数発生することが知られている。

代表者は、台風による強風被害に着目し、強風風速だけでなく被災地域の気候や構造物の建設工法、住家数の変遷など、その地域特性や生活形態に着目した被害予測手法の構築を進め、GISによるデータの整理・分析を行っており、強風被害拡大には風速だけでなく被災地域の空間的な特性が影響を及ぼすことを報告した。台風のような広域強風災害だけではなく、近年頻発する竜巻等の突風被害に対処するためには、突風の発生場所や風速の予測・分析のみならず、土地利用状況や人口密度、公共施設の位置等の空間データをあわせて被害を分析することが不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究は、都市部を襲う竜巻等の突風による住民や建物への被害規模予測手法を提案するとともに、予測確度向上に地理情報システム(GIS)による空間データ分析を利用する。また、被害予測情報をGIS上にわかりやすく視覚化して提供することで、竜巻等による突風被害低減対策に寄与しようとするものである。

### 3. 研究の方法

研究は以下の手順で進めた。

- (1) 気象庁の竜巻等の突風データベースをもとに、竜巻等の突風が発生しやすい地域を特定する。
- (2) 過去の甚大な竜巻被害情報をGISに組み込める空間データとして整理する。
- (3) 建物の大きさや密度、土地の利用状況や標高等の空間情報と竜巻による被害情報とを重ね合わせて、突風被害拡大に影響を及ぼす情報を整理する。
- (4) 突風によって人的被害が生じる場合、特に多人数が死傷する突風被害の発生位置や日時、発生状況等の情報を整理し、人的被害拡大要因を分析する。

- (5) 顕著な竜巻被害事例(2006年宮崎県延岡市での竜巻、2012年茨城県つくば市での竜巻)に着目し、竜巻中心経路と推定風速、被災建物の位置と被災程度との関係を整理する。
- (6) GIS上に重ね合わせたさまざまな時空間情報をもとに、竜巻による建物被災面積を予測する手法を提案する。
- (7) 実際の被害状況と、提案する手法による被害予測結果との比較を行い、提案手法の改善を図る。
- (8) 突風等の発生日時や位置が異なる場合の人的被害程度の想定方法を提案する。
- (9) 突風による建物被害面積の予測値および人的被害の想定情報をGIS上に整理し可視化することで、わかりやすい突風災害情報データベースの作成を目指す。

### 4. 研究成果

#### (1) 我が国の突風被害発生状況の分析

気象庁の竜巻等の突風データベースをもとに、竜巻の発生点と消失点をまとめた。竜巻は海岸部で多く発生することが知られているが、建物に半壊以上の被害が生じた竜巻等の突風の発生位置に着目すると(図1)、関東の平野部と中部地方の海岸部にその被害が集中していることが分かった。人的被害の分布も同様の傾向を示した。

特に2006年に顕著な竜巻被害が発生した宮崎県延岡市と2012年に竜巻被害が発生した茨城県つくば市周辺に着目して、建物の半壊以上の被害を発生させた竜巻の発生状況を調べた。延岡市での突風等による被害事例は多くなかったが、図2に示すようにつくば市周辺では複数の突風被害が発生しており、突風被害頻発地域であることが分かった。



図1 住家半壊以上の被害が発生した竜巻等の突風の発生状況



図2 つくば市周辺で住家半壊以上の被害が発生した竜巻等の突風

(2) 竜巻等の突風による人的被害の特徴

気象庁の竜巻等の突風データベースをもとに1961年から2016年10月末までに発生した突風2062事例から海上竜巻を除いた1549事例を調べた。うち、10人以上の死傷者が発生した事例は42件であった。フジタスケール別にみるとF3が5件、F2からF3が20件、F1からF2が12件、F0からF1が4件である。F3クラスの突風は1961年以降5件しか発生しておらず、すべての事例で10人以上の死傷者が発生した。図3にフジタスケールごとの平均死傷者数を示すが、F2を超えると急激に死傷者数が増大することがわかる。

以降では10人以上の死傷者が出た事例に着目して、突風被害報告書および朝日新聞、読売新聞から情報を収集して分析を行った。図4に場所ごとの死傷者数をまとめるが、特に負傷者が拡大するのは学校で、10事例375人の負傷者が生じた。その他の被災者が発生した場所は、電車、スーパー等の商業施設、イベントテント等の仮設建造物の周辺が多く、多くの人々が集中する場所に被害が集中することが明らかになった。

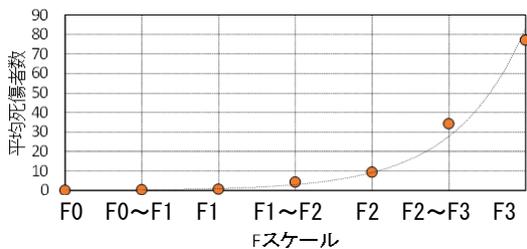


図3 フジタスケールごとの平均死傷者数

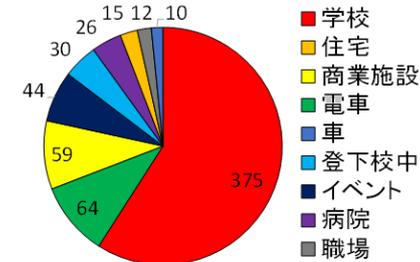


図4 突風発生場所ごとの死傷者数

表1 平日週末別場所ごとの突風事例数と死傷者

場所	平日		週末	
	事例数	死傷者数	事例数	死傷者数
学校	10	375	0	0
住宅	4	9	1	3
商業施設	3	39	1	20
職場	2	12	0	0
登下校中	2	6	1	19
病院	1	26	0	0
電車	1	21	2	43
車	0	0	1	10
イベント	0	0	3	44

表2 時間帯別場所ごとの突風事例数と死傷者数

場所	昼間(7~18時)		夜間(19時~6時)	
	事例数	死傷者数	事例数	死傷者数
学校	10	375	0	0
住宅	4	9	1	3
商業施設	3	41	1	18
職場	2	12	0	0
登下校中	3	25	0	0
病院	0	0	1	26
電車	1	6	2	58
車	1	10	0	0
イベント	2	31	1	13

表1および表2に突風被害が発生した平日・週末の別と時刻帯ごとの被害発生場所と事例数を示す。平日に被害が集中するのは学校等の教育施設と職場であった。一方でイベントテントなどの飛散による被害事例は週末に発生していた。また、表2より学校と職場、登下校中の人的被害は昼間に発生するが、電車車両の脱線等による人的被害が多い事例は夜間に発生する傾向が見られた。電車車両での被害が夜間に多く発生した理由は不明であるが、竜巻等が目視で確認できたために徐行した、または運休にしたとの報告もあることから、夜間は目視確認ができないためかもしれない。

(3) 顕著な竜巻被害事例(2006年延岡市竜巻)での建物密度に基づく建物被害予測

ここでは、た竜巻被害に着目して、被害予測検討領域の建物密度および竜巻の推定風速から領域内の建物の被災面積を予測する手法について述べる。

① 延岡市竜巻の概要と建物被害の特徴

2006年9月17日午後2時ごろ、宮崎県延岡市の海岸に発生した竜巻は速度約25m/sで北北西方向に移動し、その被害範囲は長さ約7.5km、幅150~300m、フジタスケールはF2と報告されている。住宅の強風被災度ランクごとの被害棟数を表3に、図5に被害分布の

表3 強風被災度ランクごとの延岡市竜巻での建物被害棟数

ランク	代表的な被害状況	被害棟数	係数
ランク1	テレビアンテナ・樋の損傷	241	0.1
ランク2	屋根面積30%未満で屋根葺材の飛散	283	0.3
ランク3	屋根面積30%以上で屋根葺材が飛散	310	0.5
ランク4	屋根の垂木や母屋が破損	75	0.7
ランク5	家屋の倒壊	29	0.8

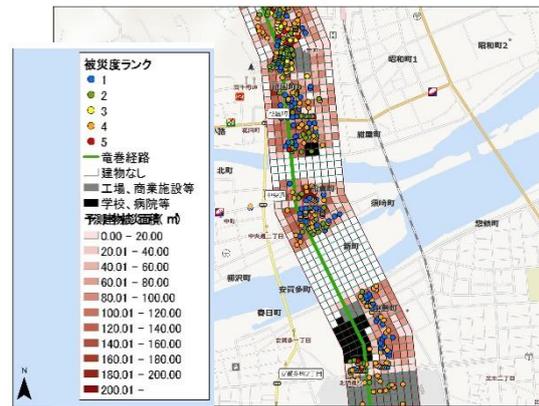


図5 延岡竜巻の被災建物分布と予測被災面積(一部)

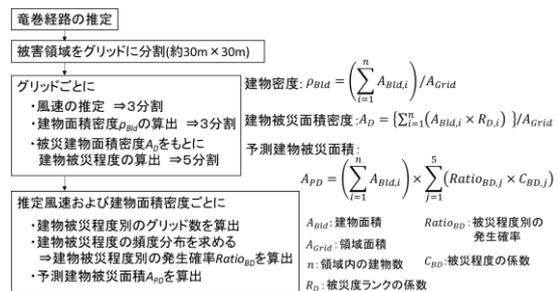


図6 建物被災面積の算出手順

一部を示すが、被害帯の中心に被災度ランクの大きな建物が分布し、川や山地などの建物の少ない領域には被害があまり出ていない。

### ② 竜巻経路の決定と被害領域の分割

建物被災面積の算出手順を図6に示す。竜巻経路の推定には建物の被害分布とランキン渦モデルによる竜巻の風速推定結果を利用する方法を用いた。決定した竜巻中心経路を基準に、被害領域をグリッド状に分割した。分割間隔は約30mとし、竜巻の進行方向が変化する地点では領域の面積が多少変化する。

### ③ グリッドの建物被災程度の算定

経路の推定に利用したランキン渦モデルをもとに、グリッド位置での風速を推定し、低風速域（推定風速30m/s以下）と中間風速域（推定風速30～50m/s）、高風速域（推定風速50m/s以上）の3通りに分類した。グリッド内に存在する建物面積の合計をグリッド面積で除した値を建物密度と定義する。

次に被災建物の分布図をもとに、グリッド内に位置する建物の強風被災度ランクを整理し、建物被災面積を算出する。表3より強風被災度ランクの一部では、屋根の被災面積割合が示されているので、被災面積におおよそ対応するように、被災度ランク1では0.1、ランク2が0.3、ランク3が0.5、ランク4が0.7、ランク5が1.0の係数を定めた。被災していない建物の係数は0となり、以下では考慮しない。グリッド内の各建物面積に被災度ランクに基づく係数を乗じ、グリッド内の建物数に対して総和を求めて被災建物面積を算出した。

図7(a)～(c)に各風速域での建物密度と被災面積の割合との関係を示す。建物密度が増加するに伴い、被災面積の割合が減少する傾向があることから、建物密度は0～20%、20～40%、40%より大きい範囲の3通りに分類して、それぞれの建物密度での建物被災面積を算定した。ここで、建物被災面積の割合を0～10%、10～30%、30～50%、50～70%、70～100%の5通りに分類し、被災程度1から5と定義した。ただし、建物被災面積が0のものは検討から除いた。つまり、被害領域内の全グリッドを、風速域（3分割）および建物密度（3分割）ごとに分類し、それぞれの領域の被災程度（5分割）を求めた。風速域および建物密度ごとに、被災程度1から5のグリッド数を集計した。図8(a)～(c)に建物密度20～40%の場合の頻度分布を一例として示す。ここでは住宅のみに着目し、被害形態が異なる工場や商業施設、病院や学校等を含むグリッドは検討していない。この頻度分布に正規分布の確率密度関数に当てはめて、被災程度ごとの発生確率を算出した。

図8にはグリッドの頻度分布に対応した正規確率密度分布を重ねて示す。低風速および中間風速域では、被災程度1と2で実際の被災程度ごとの発生割合と算出した確率との間に相違がみられた。高風速域では、建物密度によらず実際の被災程度ごとの発生割合

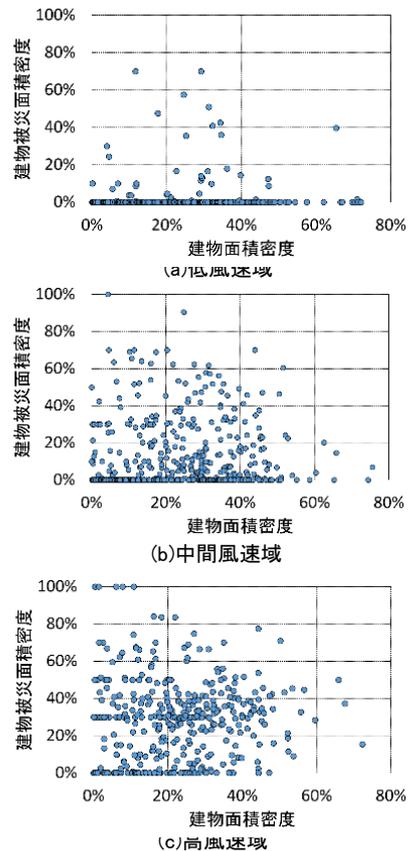


図7 建物密度と建物被災面積の割合

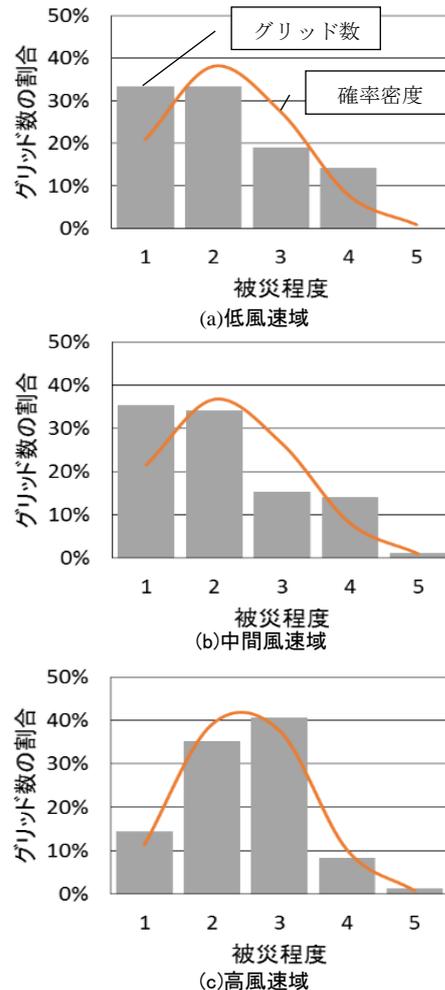
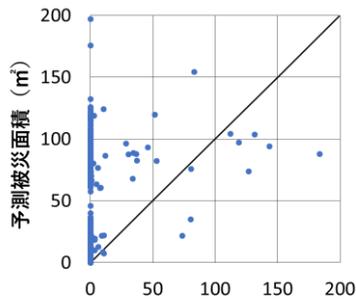


図8 被災程度別グリッドの頻度分布と発生確率密度

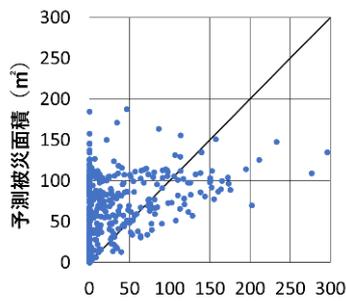
と算出した確率がある程度一致していた。低速域の被災程度が低い領域の予測には課題が残るが、以降では正規分布から算出した確率を用いて建物の被災面積の予測を行った。

④ 予測建物被災面積と実際の状況との比較

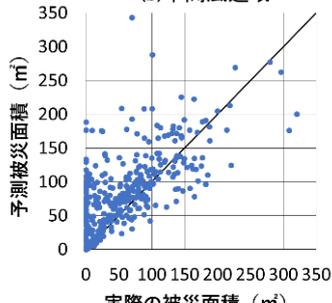
各グリッドの建物密度と推定風速が分かれば、該当する被災程度1から5の発生確率をグリッド内の建物面積合計に乗じることで、そのグリッドで予測される被災面積を算出できる。被災程度1の被災面積は10%以下なので被災程度に応じた係数を0.1とし、建物面積に係数を乗じて、予測被災面積を算出する。同様に被災程度に応じて、被災程度2では0.3、程度3は0.5、程度4は0.7、程度5は1.0の係数を乗じた。図9に各グリッドでの予測建物被災面積と実際の被害から算出した被災面積との関係を示す。すべての風速域で、実際の被災面積が0㎡でも予測値が0でないものがみられるが、本予測手法ではグリッド内に建物が存在すれば予測被害面積が0にならないためである。無被害の領域が多い低風速域では、実際の被災面積よりも予測被災面積が非常に大きい値で算出された。しかしながら、無被害の領域が少ない高



(a)低風速域



(b)中間風速域



(c)高風速域

図9 延岡市竜巻の予測被災面積と実際の被災面積との関係

風速域では、予測被災面積と実際の被災面積が比較的良く対応した。無被害の領域を予測値に反映させるとともに低風速域での領域被災程度の発生確率を正確に算定できれば、予測精度は改善すると考えられる。

(4) つくば市竜巻での建物被災面積の予測

(3)で提案した竜巻被害予測手法をつくば市での竜巻被害事例(2012)に適用して、実際の被害状況との比較をもとに被害予測精度の確認を行った。

2012年5月6日12時35分ごろ、茨城県常総市からつくば市にかけて竜巻が発生した。この竜巻の移動速度は約15m/s、被害範囲は長さ約17km、最大幅約500m、フジタスケールF3程度と報告されており、コア半径(最大接線風速に対応する半径)と最大接線風速はそれぞれ約35m、70m/sと推定されている。この竜巻では漏斗雲の目撃情報や動画等からその経路がほぼ特定されているので、その経路情報をもとに被害領域を約30m四方に分割した。風速分布はランキン渦に従うモデルで算出した。前節の方法でグリッドごとに建物密度を求めた。本報では、竜巻の被害域の中でも被害が大きかったつくば市北条地区を対象とする。グリッドの推定風速と建物密度に対応する、前節の被災程度ごとの発生確率を用いて、つくば市竜巻の各グリッドでの建物被災面積を予測した。図10に予測被災面積を実際の被害分布図と重ね合わせた。延岡市竜巻と同様に、高風速域では大きな被害面積が予測されているが、低風速域でも建物が密集する領域で被災面積が大きく予測される領域がみられた。図11に各グリッドでの予測被災面積と実際の被災面積との関係を示す。つくば市竜巻の高風速域では、無被害の領域が少なかったため、予測と実際の被害が比較的良く対応した。しかし、低風速域での対応は良くない。本手法による被害予測は安全側の値ではあるが、低風速域での無被害領域の影響を考慮すれば、より精度の高い被害面積予測が可能であると考えられる。

(5) 竜巻による建物および人的被害の想定

(1)から(3)までの成果をもとに、竜巻の被害想定を行った。

竜巻のフジタスケールごとの平均被害幅と被害長さ、過去の竜巻等の突風被害事例の

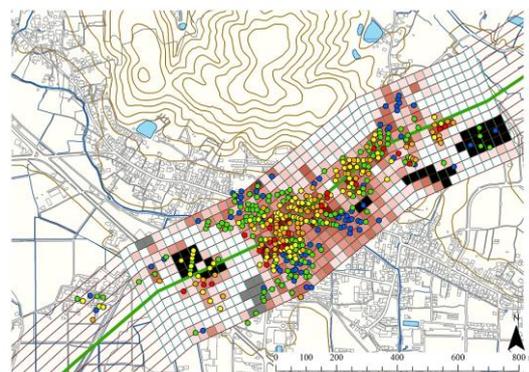


図10 延岡市竜巻の予測被災面積と実際の被災面積との関係

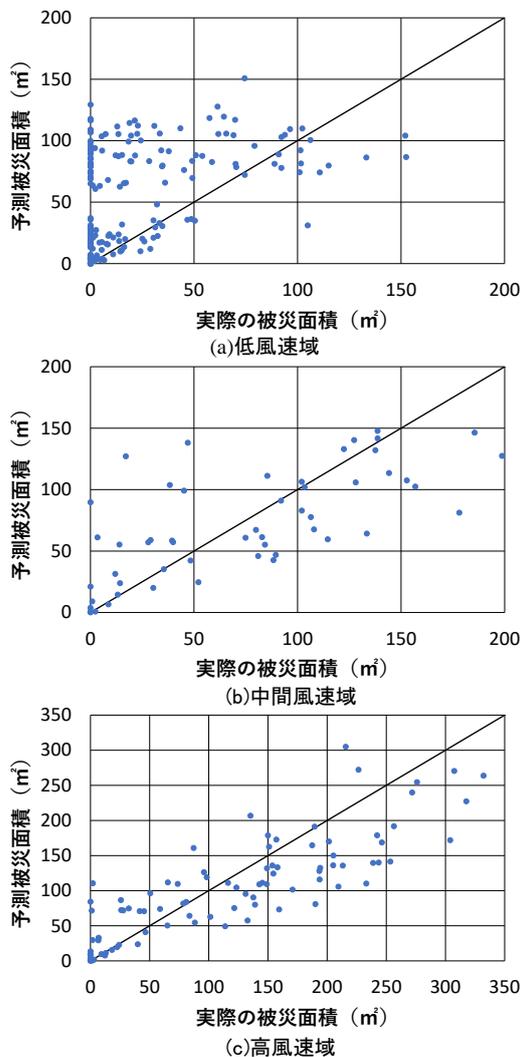


図 11 つくば市竜巻の予測被災面積と実際の被災面積との関係

件数から、宮崎県延岡市および茨城県つくば市での過去の突風被害面積を算出した。規模の小さな突風被害を含めると、延岡市の方が突風による被害面積が多く、今後の発生確率も高いと考えられる。

人的被害の程度は発生日時に影響を受けると考えられるため、実際に被害をもたらした竜巻が別の時刻に発生した場合の想定を行った。2006年9月17日日曜日午後2時に延岡市で発生した竜巻が、もし平日の同時刻に発生した場合には、小学生の下校時刻、中学校や高校での授業中、工場での就業時刻であり、負傷者は53名程度増加した可能性があることを示した。

(3)の建物被害面積予測手法をもとに竜巻中心経路の設定、フジタスケールの規模の設定をパラメータとして変化させれば、あらゆる設定での竜巻等の突風による建物被害面積の予測が可能となる。

ある地域の竜巻の発生確率、建物密度、建物の種類や広場、線路の有無等の情報をGIS上で整理し、竜巻の規模を設定することで建物および人的被害を推定する方法を提案した。また、GIS上で被害予測面積を可視化し、わかりやすい情報提供を目指した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 加藤敢士, 友清衣利子, 前田潤滋, GISを用いた2012年つくば竜巻の突風による建物被害の分析, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第29号, 査読有, 2015, pp.49-54, DOIおよびURLなし
- ② Tomikiyo Eriko, Maeda Junji, Tamura Naoya, Takemura Akito, CFD analysis of local winds associated with typhoon around mountainous terrain, Proceedings of 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, 査読有, 2014, 8 pages, DOIおよびURLなし

〔学会発表〕(計12件)

- ① 友清衣利子, 建物面積密度を利用した延岡市での竜巻による建物被災面積の予測, 日本建築学会大会(中国), 2017年8月31日, 広島工業大学(広島県広島市)
- ② 加藤敢士, 友清衣利子, 前田潤滋, 2006年に延岡市で発生した竜巻の突風による建物被害棟数と建物密度との関係, 日本建築学会大会(九州), 2016年8月25日, 福岡大学(福岡県福岡市)
- ③ 井上龍一, 友清衣利子, 前田潤滋, 1991年台風19号時の長崎2地区での強風被害拡大に及ぼす周辺建物の影響, 日本建築学会大会(九州), 2016年8月25日, 福岡大学(福岡県福岡市)
- ④ 加藤敢士, 友清衣利子, 前田潤滋, GISを用いた竜巻の突風による建物被害の分析, その1 2012年つくば市の竜巻からの距離と被害程度との関係, 日本建築学会大会(関東), 2015年9月5日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)
- ⑤ 友清衣利子, 加藤敢士, 前田潤滋, GISを用いた竜巻の突風による建物被害の分析, その2 建物規模および推定風速と被害程度との関係, 日本建築学会大会(関東), 2015年9月5日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

〔図書〕(計1件)

- ① 日本建築学会編, 前田潤滋, 友清衣利子, 他8名, 丸善, 2012年5月6日に北関東で発生した一連の竜巻による突風被害の記録, 2014, 101ページ, pp.22-60

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

友清 衣利子 (TOMOKIYO, Eriko)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号: 30346829